

二周波励起容量結合プラズマのPIC/MC法による研究

著者	若山 剛
号	2919
発行年	2002
URL	http://hdl.handle.net/10097/8192

氏 名	わかやま とう
授 与 学 位	若 山 剛
学位授与年月日	博士 (工学)
学位授与の根拠法規	平成15年3月24日
研究科, 専攻の名称	学位規則第4条第1項
学 位 論 文 題 目	東北大学大学院工学研究科 (博士課程) 機械電子工学専攻
指 導 教 官	二周波励起容量結合プラズマの PIC/MC 法による研究
論 文 審 査 委 員	東北大学教授 南部 健一
	主査 東北大学教授 南部 健一 東北大学教授 西山 秀哉
	東北大学教授 寒川 誠二

論文内容要旨

第1章 諸 論

今日まで半導体デバイスの性能向上は著しい速度で進んできた。これは加工技術が進歩し、微細化による高集積化が可能となったためである。半導体デバイスの製造では基板を微細加工することが主な工程であり、プラズマを用いた基板加工技術を駆使して LSI (large-scale integration) やメモリなどが作られている。

超微細加工を行なう場合、エッチングについて言えばより縦横比の大きな加工が必要となる。この異方性の高いエッチングは反応性イオンエッチング (reactive ion etching; RIE) を行なうことで実現される。これは化学的活性種 (ラジカル) による基板表面のエッチングがイオン衝撃により促進されるために、イオンの入射を受ける面のみがエッチングされることによる。このときイオンを基板へと引き込むため、基板設置電極に電圧を印加する方法が一般に用いられる。

しかし、イオンが過剰なエネルギーを持って基板表面を衝撃した場合、膜やデバイスの質を劣化させてしまう。一方、 SiO_2 のエッチングの場合には 300 eV–1000 eV もの高エネルギーイオンによる衝撃が必要とされる。このように基板に入射するイオンエネルギーの制御は高精度かつ信頼性の高い加工を実現する上で必須の要件であると言える。

またコスト競争力を高めるためには処理効率を向上することが必要である。同時により多くのチップの処理を可能とするため大口径 (300 mm) 基板が導入されたが、均一な加工を行なうためにはラジカルやイオンの流束分布が一様である必要がある。さらに高速に処理するためにはラジカルやイオンの流束の大きさも制御しなければならない。

ラジカルやイオンの流束と入射イオンエネルギーを独立に制御するため、プラズマ生成を行なう電源周波数として VHF (very high frequency) 帯 (30 MHz – 300 MHz) を用い、一方で入射イオンエネルギーを制御するため基板設置電極に周波数の異なる電源を用いる二周波励起容量結合型プラズマ (dual frequency capacitively-coupled plasma; 2f-CCP) が提案された。VHF 帯を用いることで低ガス圧、低電圧振幅で高密度のプラズマを生成することができ、かつ均一性の要求も満足される。さらに基板バイアス周波数に数百 kHz–数 MHz の低周波数帯を用いることでラジカルやイオンの流束と入射イオンエネルギー分布を独立に制御することができる。2f-CCP は制御自由度が高いため次世代の加工寸法である 100 nm 以下の超微細なエッチングや、様々な材料のエッチングを高い選択性を持って実現することが可能であると期待されている。そのためエッチング工程を中心として装置形状や放電条件の最適化が求められている。

そこで本研究では PIC/MC 法 (Particle-in-cell/Monte Carlo 法) による 2f-CCP の解析を行ない、最適装置設計の指針となるべく様々な放電条件の影響を調べた。PIC/MC 法による解析を行なうにあたり、まずイオン-原子衝突モデルを構築した。本モデルにより得られたスウォームパラメータと測定値との比較により、本モデルの妥当性を示した上で PIC/MC 法による解析に用いた。また無衝突の仮定の下に高周波バイアス基板に入射するイオンの速度分布関数を解析的に求め、これを参考にして PIC/MC 法により得られる結果を考察した。

第 2 章 イオン-原子衝突モデル

簡便で計算負荷の小さいイオン-原子衝突モデルを提案し、その妥当性について検証した。これは弾性衝突および共鳴電荷交換衝突を考慮したイオン-原子衝突モデルであり、弾性衝突による等方散乱と電荷交換衝突が等しい確率で起こるとするモデルである。電荷交換衝突としては電荷スイッチモデルを採用した。単原子分子である希ガスに対して $\text{Ar}^+ - \text{Ar}$, $\text{He}^+ - \text{He}$, $\text{Ne}^+ - \text{Ne}$, $\text{Kr}^+ - \text{Kr}$ 衝突モデルを用いてドリフト速度、横拡散係数の値を求めたところ、実験値を非常に良く再現した。

さらに C_{60}^+ が He ガス中で一様電場によってドリフトする場合に、剛体球による等方散乱モデルを用いて粒子シミュレーションを行ない、得られたドリフト速度が希薄気体力学における自由分子流の理論値とよく一致することを示した。すなわち構築した衝突モデルにおいて弾性衝突のみを考慮することで、共鳴電荷交換衝突のない系においても本モデルが妥当であることを示し、広い応用範囲を有することを示した。

第 3 章 速度分布関数の確率論的解析

高周波バイアスの場合に、無衝突シースの仮定の下で確率論を用いて、バイアス基板に入射するイオンの速度分布、エネルギー分布、角分布をマクロなプラズマパラメータの関数として解析的に表現した。これは基板入射イオンの速度分布関数を制御する上で重要な意義を持つ。

解析的に求められた分布関数は 2 つのパラメータにのみ依存することが分かった。またプラズマ-シース境界でのイオンの速度分布を考慮に入れることで、基板入射イオン速度分布関数の持つピークは有限の値となり、分布形状に裾野部分が形成されることが明らかとなった。求められた解析解はイオンがシースを横切る時間に対してバイアス周期が十分短い場合に妥当であり、その適用範囲についても定量的に示した。

第 4 章 一次元プラズマの構造

PIC/MC 法を用いて一次元 2f-CCP の解析を行ない、時空間構造を明らかにした。軸方向一次元モデルでは装置形状が幾何学的に対称となるため、自己バイアス電圧はゼロに近い値になることが分かった。また電極電位は両電極上で異なるにもかかわらず、シースの変動は両側電極で位相が π ずれた構造となっており、これがシース電圧にも反映されることが明らかとなった。その結果シース電圧波形も両側電極で位相が π ずれた構造となる。したがってシース電圧は両側電極で位相のみが異なる波形となり、両電極に入射するイオンのエネルギー分布関数はほぼ同じものとなることが分かった。

また一次元解析は計算負荷が小さいという利点を生かし、バイアス条件に対する放電構造の依存性を始めとして様々な放電条件に対する放電特性を調べた。イオン数密度の最大値は、低周波バイアスの電圧振幅および周波数によってあまり変化しないが、高周波バイアスの周波数に強く依存することが分かった。また電極に入射するイオンのエネルギー分布関数は、低周波バイアスの電圧振幅または周波数に強く依存し、高周波バイアス周波数にはほとんど依存しないことも分かった。したがって高周波バイアスによりプラズマを生成し、低周波バイアスにより入射イオンエネルギーを制御するという二周波バイアスの特性が明らかになった。

第 5 章 軸対称二次元プラズマの構造

一次元モデルに対する解析手法を軸対称二次元モデルに拡張し、2f-CCP の解析を行なった。計算モデルを図 1 に示す。基準とした条件は電極間距離 $L = 20 \text{ mm}$ 、ガス圧力 $p = 25 \text{ mTorr}$ 、高周波バイアス周波数 $f_H = 60 \text{ MHz}$ 、高周波バイアス電圧振幅 $V_{rf,H} = 150 \text{ V}$ 、低周波バイアス周波数 $f_L = 2 \text{ MHz}$ 、低周波バイアス電圧振幅 $V_{rf,L} = 500 \text{ V}$ である。さらに軸対称二次元モデルにおける幾何形状因子として装置側壁半径 $R = 150 \text{ mm}$ 、HF 電極半径 $R_H = 110 \text{ mm}$ 、LF 電極半径 $R_L = 100 \text{ mm}$ とした。図 2 に時間平均された電位の空間分布を示す。二次元モデルでは電極半径が有限であるため、一次元モデルと異なり自己バイアス電圧はゼロとはならない。したがって放電構造は非対称となる。両電極の自己バイアス電圧はそれぞれ $V_{dc,H} = -4.841 \text{ V}$ 、 $V_{dc,L} = -328.2 \text{ V}$ と求まった。一次元モデルとの大きな違いは、低周波バイアス電極 (LF 電極) 側に大きな負の自己バイアス電圧が生じることであり、この自己バイアス電圧は入射イオンのエネルギー分布に大きな影響を及ぼすことが分かった。図 3 に時間平均されたイオン数密度の空間分布を示す。装置側壁近傍を除き、半径位置 r を固定した場合の軸方向分布は一次元モデルの場合と同様の分布である。しかし LF 電極に生じる大きな自己バイアス電圧の影響によりイオン数密度についても非対称な構造となっており、軸方向分布の極大値は電極間中央より若干 HF 電極寄りにある。

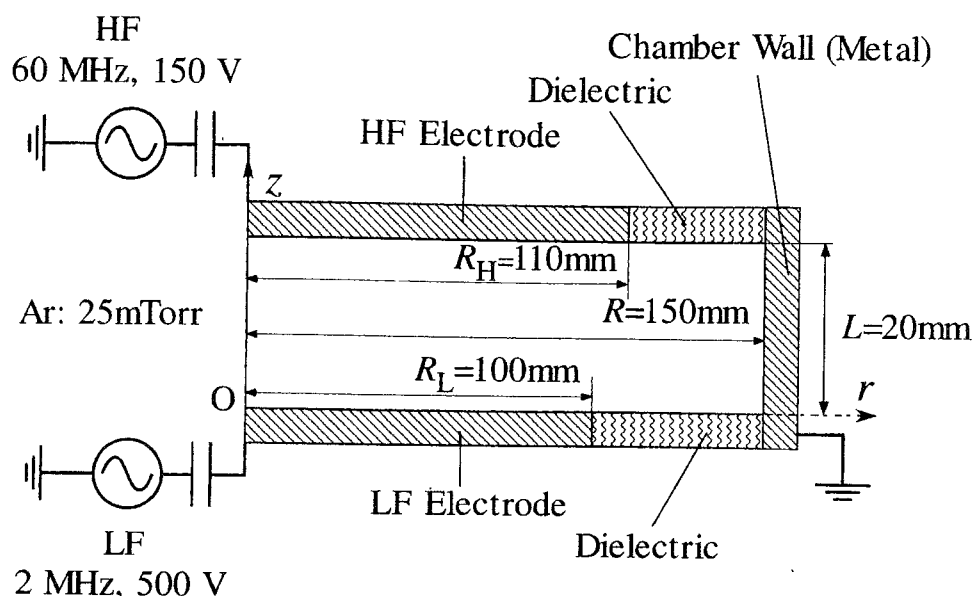


図 1 軸対称二次元モデル

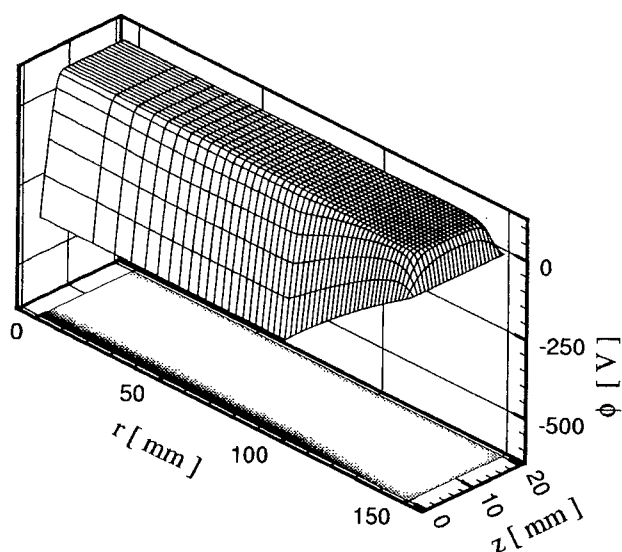


図 2 時間平均電位の空間分布

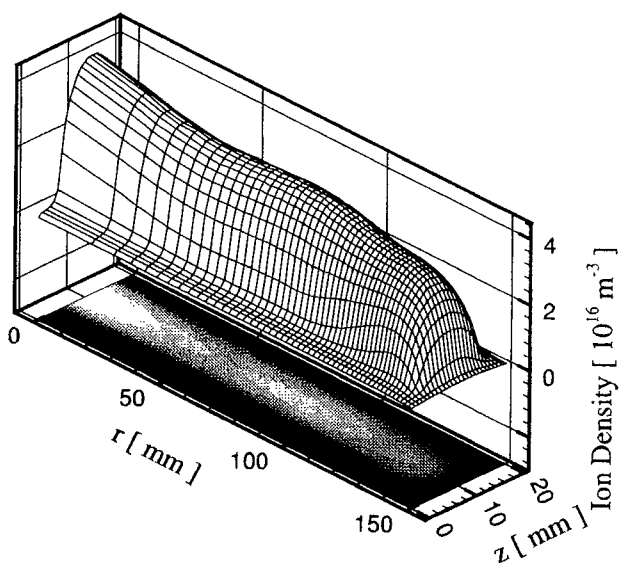


図 3 時間平均イオン数密度の空間分布

また半径方向分布について言えば、 z 軸付近 ($r \simeq 0$) および LF 電極端付近 ($r \simeq R_L$) で極大値をとり、装置側壁に近づくにつれて減衰する。

次に装置形状などの幾何学的条件が及ぼす放電構造への影響を調べ、放電構造の半径方向分布やイオン流束の基板上の分布を明らかにした。図 4, 5 に LF 電極に入射するイオンの流束分布およびエネルギー分布を示す。図 4 より電極間距離を小さくすると軸付近以外の領域でイオン流束が大きくなり、結果として電極への流束の一様性が改善されることが分かった。一方、図 5 より電極間距離を変えても入射イオンのエネルギー分布は変化しないため、基板内での一様な加工の実現に向けて電極間距離を最適化することは有効な方法であると言える。また装置側壁半径を大きくすると装置側壁による電極間放電領域への影響が小さくなり、電極半径内の領域で主に放電が起こるため入射イオン流束はより一様なものとなることが分かった。したがって電極端から装置壁までの距離が電極間距離に比して大きくなるように装置側壁半径を決定する必要があると言える。さらに高周波バイアスが主要なプラズマ生成源であるため LF 電極半径よりも高周波バイアス電極 (HF 電極) 半径が小さい場合、LF 電極端でのイオン流束が減少することが分かった。したがって LF 電極半径よりも HF 電極半径を大きくする必要があると言える。

電極における二次電子放出の影響を調べたところ、電極の二次電子放出は入射イオンのエネルギー分布および流束分布にほとんど影響を及ぼさないことが分かった。

低周波バイアス電圧振幅については、低周波バイアス電圧振幅とともに自己バイアス電圧の大きさが増大するため、入射イオンエネルギー分布は低周波バイアス電圧振幅に強く依存することが分かった。このとき大きな負の自己バイアス電圧により電極端領域へ入射するイオン流束が増大するため、流束分布の様性は低周波バイアス電圧振幅を 500 V 以上とすることで改善されることも分かった。

低周波バイアス周波数の影響を調べたところ 2 MHz 以下の範囲では低周波バイアス周波数は入射イオンエネルギー分布にほとんど影響を与えないことが分かった。一方高周波バイアス周波数については、高周波バイアス周波数とともにイオン数密度が増大し、入射イオン流束も増すが、80 MHz 以上の高周波バイアスを用いると入射イオン流束の半径方向一様性が悪化するため、60 MHz が最適であると言える。

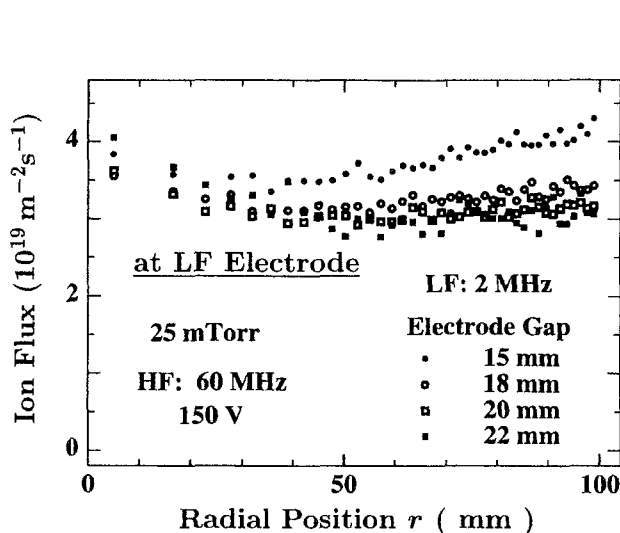


図 4 LF 電極に入射するイオンの流束分布

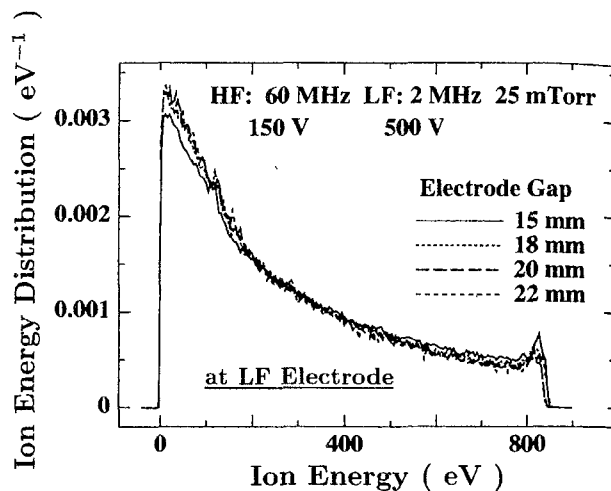


図 5 LF 電極に入射するイオンのエネルギー分布

第 6 章 結 論

本研究によって得られた成果を総括した。

以上、本論文では PIC/MC 法による 2E-CCP の解析を行ない、特に基板入射イオンの流束およびエネルギー分布の観点から、最適装置設計の指針となるための知見を得た。

論文審査結果の要旨

反応性イオンエッチング用プラズマ源の一つとして、二周波励起容量結合プラズマ (2f-CCP) が注目されている。プラズマ生成を行なう電源周波数として VHF 帯を用い、一方で、基板に入射するイオンのエネルギーを低周波のバイアスで制御する方式である。2f-CCP については、流体モデルによる解析が行なわれているが、低気圧の条件下ではモデル自身の妥当性に問題がある。また基板に入射するイオンのエネルギー分布を、正確に求めることはできない。本論文は、粒子モデルによって 2f-CCP を解析したもので、全編 6 章からなる。

第 1 章は緒論である。第 2 章では、イオンと同種粒子の共鳴電荷交換衝突をモデル化し、簡便で計算負荷の小さいイオン—原子衝突モデルを構築している。またこのモデルの妥当性を、ドリフト速度と横拡散係数の計算値が実験値と一致することを示すことによって証明している。本モデルは今後のプラズマ解析に有用である。

第 3 章では、無衝突シースの仮定のもとで、高周波バイアスをかけた基板に入射するイオンの速度分布関数を、確率論を用いて解析的に求めている。この結果は、速度分布関数に及ぼす外部パラメータの影響を陽的に表現していることから、イオン速度分布関数を制御するうえで重要な知見である。

第 4 章では、一次元電場の仮定の下に、二周波励起容量結合プラズマの構造を PIC/MC 法を用いて解析し、放電条件に対するプラズマ構造の依存性を系統的に明らかにしている。例えば、一次元電場では自己バイアスが発生しないこと、高周波電極と低周波電極の周波数と電圧振幅が共に異なっても、シース電位の変動は位相が 180 度ずれるだけであること、プラズマ密度は高周波バイアスの周波数のみで決まること、低周波電極に入射するイオンのエネルギー分布は、この電極の周波数と電圧振幅にのみ依存することが明らかにされている。これらの結果は、信頼性の高い粒子モデルを用いて二周波励起容量結合プラズマの基本特性を明らかにしたもので、装置設計上有用な知見である。

第 5 章では、実際の装置に近い軸対象二次元の装置モデルに対し、二周波励起容量結合プラズマの基本構造を調べている。特に電極間距離、電極半径および装置側壁半径などの形状因子が、放電構造とイオンエネルギー分布に及ぼす影響を明らかにしている。具体的には、低周波電極での大きな負の自己バイアスの発生、電極間距離、電極半径、装置側壁半径に対する最適値の存在、イオン数流束の半径方向一様性の実現に必要な、低周波電極の電圧振幅と高周波電極の周波数を明らかにしている。これらは装置設計上重要な知見である。

第 6 章は結論である。

以上要するに、本論文は二周波励起容量結合プラズマ装置の最適設計に必要な知見を得たもので、流体力学および電子工学の発展に寄与するところが少なくない。

よって、本論文は博士(工学)の学位論文として合格と認める。